



# Planification des travaux pour un contrôle optimal des terrains

Marwan Al Heib, Hafid Baroudi

## ► To cite this version:

Marwan Al Heib, Hafid Baroudi. Planification des travaux pour un contrôle optimal des terrains. Journée de présentation des résultats INERIS à CdF, Jun 1994, Hombourg-Haut, France. pp.6-11. ineris-00971889

**HAL Id: ineris-00971889**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00971889>**

Submitted on 3 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# **Planification des travaux pour un contrôle optimal des terrains**

AL HEIB M. M. - BAROUDI H.  
INERIS

## **1. INTRODUCTION**

La planification des travaux d'exploitation tient compte de nombreux facteurs liés à l'organisation des chantiers, à la ventilation et aux pressions des terrains. Avec l'approfondissement des exploitations et parfois l'ouverture de nouveaux chantiers dans des environnements proches d'anciennes exploitations, les pressions des terrains devient l'un des principaux critères qu'il convient de maîtriser.

La maîtrise des pressions des terrains passe par l'expérience acquise complétée par des études spécifiques pour les nouvelles situations. Les outils de modélisation numérique des massifs rocheux aident à la compréhension des mécanismes qui surviennent autour des ouvrages existants (rétro-analyse) et contribuent à la planification des nouveaux chantiers.

Cet article présente la notion et les facteurs dont dépendent les "pressions des terrains" liées aux méthodes d'exploitation par longue taille. Ensuite, à l'aide de cas concrets on discutera de l'apport de la modélisation comme outil contribuant à la maîtrise des pressions des terrains en vue de la planification optimale des chantiers.

## **2. METHODES D'EXPLOITATION**

L'exploitation par taille est la méthode la plus répandue pour exploiter les gisements de charbon. L'abattage est effectué sur un front de 100 à 400 m de largeur qui se déplace sur l'ensemble du panneau à exploiter (fig. 1). Il existe plusieurs catégories d'exploitations par taille :

- la longue taille, dont la longueur peut atteindre 250 m et davantage ;
- la taille courte dont la longueur avoisine 50 m ;
- la mini-taille dont la longueur se situe aux environs de 25 m.

Le front de taille avance parallèlement aux deux voies de desserte : la voie de tête, bordée généralement par les vieux travaux de la taille précédente (tailles adjacentes), et la voie de base, bordée par le massif vierge.

A sa naissance, la taille n'est qu'une simple voie. Avec l'avancement du front, le vide créé et la zone où l'équilibre des terrains est modifié, deviennent importants et se manifestent alors les effets des "pressions des terrains". Les modifications de comportement du massif qui en résultent dépendent à la fois des conditions naturelles et des conditions d'exploitation.

Un volume très important de terrains est affecté par les travaux d'exploitation. Des désordres peuvent entraîner des ruptures qui se traduisent, dans la majorité des cas, par des déformations et des déplacements d'ensemble des ouvrages parfois importants. Des ruptures brutales appelées coups de terrains ou phénomènes dynamiques, peuvent également se produire.

### **3. VOLUME D'INFLUENCE**

Le volume d'influence est défini comme l'ensemble des points de l'espace souterrain, mis en mouvement à cause de l'exploitation ou comme le volume de terrains soumis à la fracturation. Ceci, selon que l'attention porte davantage sur l'un ou l'autre de ces deux aspects des phénomènes.

#### ***3.1. Paramètres définissant le volume d'influence***

Le volume d'influence dépend des facteurs imposés par l'exploitant tels que l'utilisation du remblai, la largeur de panneau, et par les conditions naturelles d'une exploitation : présence d'un toit composé de bancs de natures très variées, de contraintes naturelles ou tectoniques anisotropes. Certains facteurs complexes ne sont pas pris en compte par les règles de pression des terrains.

#### ***3.2. Volume d'influence et comportement des ouvrages***

En ce qui concerne les ouvrages qui se situent au voisinage d'une exploitation, la zone d'influence se divise schématiquement en 4 zones, représentées sur la (fig. 2) :

- zone 0 : les ouvrages sont situés au-dessus ou au-dessous du charbon encore en place. On n'y observe pas d'influence.
- zone 1 : les ouvrages sont situés dans la zone limite de l'exploitation : effet limite, qui correspond à une augmentation de contraintes, et se traduit par de fortes déformations.
- zones 2 et 3 : les ouvrages, situés au toit ou au mur de la zone exploitée, sont en zone détendue ; ceci se traduit par un déplacement d'ensemble (affaissement ou montée des terrains).

#### ***3.3. Zone d'influence et le foudroyage***

On distingue au-dessus du foudroyage et jusqu'à la surface (fig. 3), l'existence de trois zones distinctes identifiées par leur comportement :

#### *a) Zone foudroyée*

La hauteur de cette zone varie entre 2 et 8 fois la puissance de la couche exploitée. Le facteur de foisonnement est supérieur à 1, sa valeur définit la hauteur de cette zone, il est fonction du comportement du massif et de la puissance de couche.

#### *b) Zone fracturée*

Elle se situe entre la zone foudroyée et le premier banc continu. Les bancs sont décomposés en blocs limités par des joints ou fissures quasi verticaux à cause de la rupture, et des plans de la stratification. Les contraintes horizontales (confinement) empêchent les blocs de bouger individuellement. La hauteur de cette zone varie d'environ 30 à 40 fois l'ouverture de la couche exploitée dans les mines à faible profondeur. En Lorraine cette hauteur se limite à environ 12 à 15 fois l'ouverture (PENG et al, 1984).

#### *c) Zone non fracturée*

Cette zone s'étend au-dessus des bancs fracturés jusqu'à la surface du sol. Dans cette zone, les bancs restent à peu près intacts, on ne remarque plus de décomposition en blocs, les bancs se comportent comme des poutres de résistances et d'épaisseurs différentes.

### ***3.4. Zone d'influence et les contraintes induites***

Les contraintes développées autour d'un panneau après exploitation sont des surcontraintes de compression au front de la taille et des contraintes de traction dans l'arrière taille. Elles conduisent à une fracturation du massif.

Sur les autres bords du panneau, le long de la voie de tête et de la voie de base, s'établit également une zone de fortes contraintes. Mais celles-ci n'atteignent leur valeur maximale qu'à une certaine distance derrière le front de taille (Fig. 4). Ces zones latérales constituent les appuis des bancs qui se sont affaîssés au-dessus du vide de la partie exploitée. Les contraintes peuvent atteindre plusieurs fois la pression initiale. Elles sont plus importantes pour des largeurs de front importantes.

Lorsque les terrains sont soumis à une deuxième influence, ils se comportent comme des terrains fracturés, les effets sont aggravés par rapport à ceux ressentis dans des terrains intacts.

### ***3.5. Zone d'influence et l'affaissement minier***

Les déformations doivent être nécessairement prévues et contrôlées avant la réalisation d'une exploitation sous des zones dites sensibles à l'affaissement minier.

En phase finale, les terrains une fois stabilisés, une cuvette d'affaissement s'est formée à la surface du sol au-dessus de la zone d'exploitation. Au centre de la cuvette, on parle d'affaissement maximal. Cet affaissement atteint une valeur limite maximale pour une largeur d'exploitation appelée largeur critique. L'affaissement maximal dépend du charbon et du recouvrement ; de la profondeur et de la largeur de l'excavation, de l'épaisseur de la couche exploitée, du type de soutènement et du traitement de l'arrière taille et de la topographie. Les méthodes de prévision permettant d'estimer l'ampleur des affaissements sont nombreuses :

- des formulations analytiques ou des calculs numériques,
- la méthode empirique basée sur les observations et les mesures de l'affaissement à la surface pour de nombreux cas, permet d'établir des relations entre l'excavation et l'observation à la surface.
- la modification par des maquettes de petite échelle.

Un progrès est réalisé en utilisant les modèles numériques qui ont permis d'estimer une courbe d'affaissement assez réaliste alors qu'il était impossible de l'estimer dans le cas des modèles en milieu continu, malgré les hypothèses sur les caractéristiques mécaniques des terrains.

## **4. LES PRESSIONS DES TERRAINS : FACTEURS D'INFLUENCE**

### ***4.1. Importance de la largeur d'exploitation, notion de la largeur critique***

Un paramètre important pour l'exploitant est la longueur d'un panneau, le choix de la longueur "L" résulte du compromis entre de nombreux critères touchant au comportement des terrains avoisinants et du recouvrement, à la production journalière et aux conditions pratiques de conduite du chantier.

Une analyse statistique (Analyse en Composantes Principales), conduite à partir d'un échantillon de 26 chantiers en Provence (Fig. 5), montre que, vis-à-vis du risque de coups de terrains, les chantiers affectés présentent des longueurs totales exploitées souvent importantes, c'est à dire égales ou supérieures à la largeur critique à partir de laquelle les terrains du recouvrement se trouvent fortement sollicités en cours d'exploitation (REVALOR et al, 1989). Cette étude a mis en évidence qu'au delà d'une largeur exploitée correspondant à deux tailles de 150 m soit 300 m, au delà de laquelle une forte activité sismique a été enregistrée.

#### ***4.2. Méthodes de traitement de l'arrière taille et les pressions des terrains***

Le volume d'influence d'un panneau remblayé est inférieur au volume d'influence d'un panneau foudroyé de même longueur. La présence du remblai diminue le développement des zones détendues et l'existence d'une contrainte de traction au-dessus et en dessous de la taille exploitée.

Le processus du foudroyage et son comportement est un élément difficile à mesurer pourtant il présente un aspect crucial pour déterminer les conditions dans lesquelles les exploitations se réalisent. Grâce aux modèles numériques, on a pu étudier :

- les conditions dans lesquelles apparaît le premier foudroyage,
- l'évaluation des volumes de terrains concernés,
- l'évolution du processus de foudroyage.

Deux types de modélisation peuvent être utilisés pour étudier l'influence du foudroyage sur la redistribution des contraintes dans le massif au voisinage d'une taille :

- modélisation par un milieu continu équivalent, le foudroyage est remplacé par un matériau équivalent très déformable,
- modélisation par un milieu discontinu, le milieu est stratifié, la zone du foudroyage est prédécoupée par des petits blocs

Nous avons décrit les mouvements des blocs et de bancs de stratification qualitativement. La distribution des contraintes dans le massif dépend de la stratification. La concentration des contraintes dans un banc résistant dans le haut toit, peut expliquer les phénomènes de rupture engendrés après l'exploitation dans ce genre de conditions. En modélisant aussi le foudroyage, une corrélation a été établie entre la courbe empirique pour la prévision de l'affaissement et des valeurs calculées (Fig. 6).

La sensibilité des valeurs des contraintes à la méthode du traitement de l'arrière-taille est surtout importante pour des panneaux de grandes longueurs (au delà de 100 m). Pour une faible longueur du front de taille, la présence de remblai ne modifie guère les surcontraintes aux bords de la taille.

#### ***4.3. Les contraintes naturelles et la planification***

Dans le cas d'exploitation par longue taille, le tenseur des contraintes naturelles et la direction de l'avancement ainsi que le pendage déterminent les conditions dans lesquelles le foudroyage se réalise. Pour une planification optimale, il convient de déterminer la direction d'avancement appropriée permettant d'assurer la sécurité et de meilleures conditions

d'exploitation des ouvrages. Les modes de rupture dans le volume d'influence dépendent de l'état final des contraintes et de leur orientation.

Pour des contraintes horizontales naturelles anisotropes (Fig. 7), examinons deux directions d'avancement par rapport aux contraintes initiales. Le premier cas "I" correspond à une direction d'avancement parallèle à la contrainte horizontale mineure. Le cas "II" correspond à une direction d'avancement parallèle à la contrainte horizontale majeure. Les analyses des résultats de modélisations numériques montrent que :

- la distribution des contraintes après l'excavation est fondamentalement différente ;
- les contraintes de traction, se localisent seulement dans une petite zone dans le cas "I". En revanche, dans le cas "II", cette zone est relativement plus importante.

Cette comparaison permet d'apprécier le rôle des contraintes naturelles pour la planification et le choix d'une direction d'avancement, vis-à-vis de la fracturation du toit.

#### ***4.4. Avancement de deux tailles vers un pilier ou à partir d'un pilier***

Le choix de la direction de l'avancement d'une exploitation est un aspect très important pour la planification de la mine. Il est important de préserver les piliers de contraintes élevées le plus tard possible, cela permet d'assurer la stabilité des ouvrages d'infrastructure qui sont implantés dans ces piliers. La largeur réelle d'un pilier ne se définit qu'après l'exploitation de la dernière tranche des deux panneaux.. Dans certains cas, les exploitants sont amenés à changer le côté de démarrage pour des panneaux voisins (cas de la veine K de Forbach) pour des raisons pratiques de chantier.

L'exploitant doit comparer l'évolution des contraintes pour plusieurs directions d'avancement et donc déterminer le cas pour lequel le pilier est le moins sollicité (Fig. 8).

Un cas simple correspond à deux panneaux séparés par un pilier, trois directions d'avancement sont possibles :

cas 1 : le premier panneau avance vers le pilier, puis le deuxième aussi vers le pilier (exploitations convergeant vers le pilier).

cas 2 : exploiter le premier panneau avançant vers le pilier, puis le deuxième démarre à partir du pilier.

cas 3 : le premier panneau démarre à partir du pilier, le deuxième démarre ensuite, à partir du pilier (exploitations divergentes par rapport au pilier).

On découpe le panneau en 8 tranches. La charge finale dans le pilier est identique pour les trois cas (dans l'hypothèse considérée : milieu élastique). En revanche, le chemin des contraintes principales en fonction de l'exploitation montrent des évolutions différentes. Nous remarquons que pour le premier cas, les contraintes dans le pilier sont dues à la quatrième et huitième tranche seulement. En revanche, dans le cas n°3, les contraintes augmentent linéairement en fonction de l'avancement de l'exploitation. Le cas n°2 montre un

comportement similaire au premier cas pour les quatre premières tranches, puis un comportement similaire au cas n° 3 pour la suite.

Le pilier peut être en rupture dès la cinquième tranche dans le cas n°3, alors que cette rupture n'apparaît qu'à la fin de l'exploitation dans le premier cas.

#### ***4.5. Conditions géologiques et géotechniques***

Les pressions des terrains dépendent de la nature et des paramètres géotechniques des terrains avoisinants les ouvrages. Selon les caractéristiques du banc du toit, par exemple un banc épais de calcaire ou un banc de grès, dépend la distribution des contraintes induites aux bords et au milieu de la taille ainsi que dans le banc lui-même.

### **5. LA MODÉLISATION : UN OUTIL D'AIDE À LA PLANIFICATION**

Les bureaux d'études chargés de la planification font appel de plus en plus aux modèles numériques. On distingue entre deux types de modèle : simple et rapide permettant de répondre au premier besoin et une modélisation complexe pour des problèmes particuliers de la planification. La modélisation par la méthode des Eléments Finis a permis d'étudier et d'analyser la zone en surcontrainte et les valeurs maximales des contraintes. Ce type de modèle a pu reproduire, de manière descriptive, les phénomènes observés et établir des règles applicables dans la stratégie de planification.

En République Fédérale Allemande, une autre forme de modélisation numérique simplifiée a été développée pour les charbonnages, dans le cas des gisements tabulaires, par EVERLING (1972). Ce modèle s'avère d'une utilité pratique en tant que base de comparaison entre des configurations d'exploitations différentes. Le logiciel SUIT3D s'applique aux problèmes liés à l'exploitation minière (longue taille, chambres et piliers,...) en tenant compte du foudroyage d'une façon simple. Ces différents problèmes peuvent être traités en modélisation tridimensionnelle, dans un milieu homogène isotrope.

En Australie (WARDEL et al, 1985), les méthodes numériques font partie intégrante de la planification et sont un outil utilisé pour résoudre des problèmes liés à l'exploitation.

En Afrique du Sud, pour des problèmes liés aux phénomènes dynamiques associés à une faille, la modélisation numérique par la méthode "discontinuité de déplacements", a été modifiée pour calculer un paramètre ("ESS" : Excess Shear Stress) permettant à l'exploitant de planifier le chantier.

On dispose donc actuellement d'une conception globale, assez satisfaisante en moyenne, des mécanismes induits par l'exploitation, conception établie par la confrontation féconde d'observations, de mesures et de modèles théoriques assez élaborés (analytiques ou numériques).



Toutefois, la réalité est si complexe, et les conditions d'exploitations si variées qu'on se trouve régulièrement en face de phénomènes inattendus, singuliers par rapport à ceux qui sont régulièrement répertoriés.

La multiplication de cas d'études, et en même temps, les progrès des méthodes de modélisation permettent de progresser dans le domaine de la planification en pression des terrains.

## **6. CAS ÉTUDIÉS**

Nous avons montré l'importance des conditions naturelles et le volume d'influence. La détermination de l'étude des contraintes induites d'un certain nombre de panneaux, ne peut se faire que par la modélisation numérique. Nous illustrons ceci par quelques cas présentant des comportements particuliers.

### ***6.1. Interprétation des mesures de contraintes à Merlebach***

Pour expliquer les contraintes initiales mesurées à Merlebach, une coupe verticale transversale de l'anticlinal a été modélisée par Eléments Finis sous la forme d'un assemblage plissé de bancs pesants, aux caractéristiques mécaniques très contrastées, simulant grossièrement la succession des couches et des terrains houillers, sur une profondeur de 2000m et une largeur de 4000 m environ (GEORGE et al, 1981) (Fig. 9). Grâce à cette modélisation et en prenant en compte les caractéristiques structurales du gisement, on a pu éclairer la question de la variabilité des contraintes mesurées à Merlebach. Les contraintes sont extrêmement variables suivant les bancs dans lesquels les contraintes sont calculées, en intensité et aussi en directions principales.

### ***6.2. Présence d'une faille au toit de l'exploitation***

Le quartier étudié est L'Étoile Sud à l'U.E. Provence. L'étendue des zones affectées dans les voies laissait en fait supposer une origine relativement haute dans le toit et une zone d'influence relativement importante. Trois failles préoccupent dans les bancs calcaires du toit un coin auto-desserrant qui surplombe les chantiers (Fig. 10). La modélisation numérique montrait une vaste zone de terrains détendus par l'exploitation, qui s'étend relativement loin et concerne pratiquement l'intégralité des failles. L'exploitation du panneau provoque un déconfinement relativement étendu de la faille. Le déconfinement et l'augmentation des cisaillements vont être à l'origine du glissement de failles.

### ***6.3. Modélisation en grand du gisement de Cocheren (U.E REUMAUX)***

Des conditions de terrains difficiles ont été rencontrées au niveau 930 m dans la veine Frieda 4 : de fortes déformations ont été observées, ainsi que des chutes de blocs au toit de la taille Frieda 5a. Cette taille a dû être arrêtée prématurément parce que l'avancement était rendu très difficile, alors que le secteur devait être détendu (au sens des règles classiques de pression de terrains).

Les règles classiques et simples de planification des chantiers dans un gisement dense ne sont plus suffisantes pour expliquer les fortes déformations. Les influences de stot que l'on peut retrouver assez loin et les détentes insuffisantes peuvent expliquer les très fortes déformations observées dans la voie (Fig. 11).

### ***6.4. Analyse du comportement d'un pilier à l'U.E. Forbach***

Des déformations très importantes ont été observées dans les infrastructures situées dans le stot (Fig. 12). La convergence cumulée a atteint fréquemment plusieurs mètres. Les fronts nécessitant une remise à section des voies montrent clairement que les bancs de stériles ont été entraînés et plissés par l'expansion des bancs de charbon vers le T.B. (Travers Banc). Les boulons ont été déformés et ont notamment subi des effets de cisaillement le long des plans de stratification. Ils ne se sont toutefois rompus qu'exceptionnellement.

Les analyses réalisées montrent que les différences de comportement observées sont dues à la distance entre le banc rigide du toit et la couche exploitée. Le fait de rapprocher de 15 m le banc de conglomérat du toit de la veine K diminue considérablement la contrainte principale mineure ( $\sigma_3$ ) ce qui se traduit par une augmentation du cercle de Mohr (Fig. 13) et donc des conditions de rupture.

## **7. CONCLUSION**

La planification des chantiers repose sur les compréhensions des phénomènes de pressions de terrains, mais aussi sur l'expérience acquise en la matière (ces dernières années, les recherches se sont orientées vers l'étude des conditions complexes. Les mesures, les observations et les modèles numériques ont conduit à l'établissement d'une méthodologie efficace. Pour améliorer la planification de l'exploitation, l'exploitant peut toujours utiliser les règles simples ou des calculs simples, mais dans des conditions complexes ou dans les cas où il est confronté à des problèmes d'instabilité, il faudra s'orienter vers un modèle global capable d'identifier les zones à risques et les causes qui sont à l'origine des phénomènes observés.

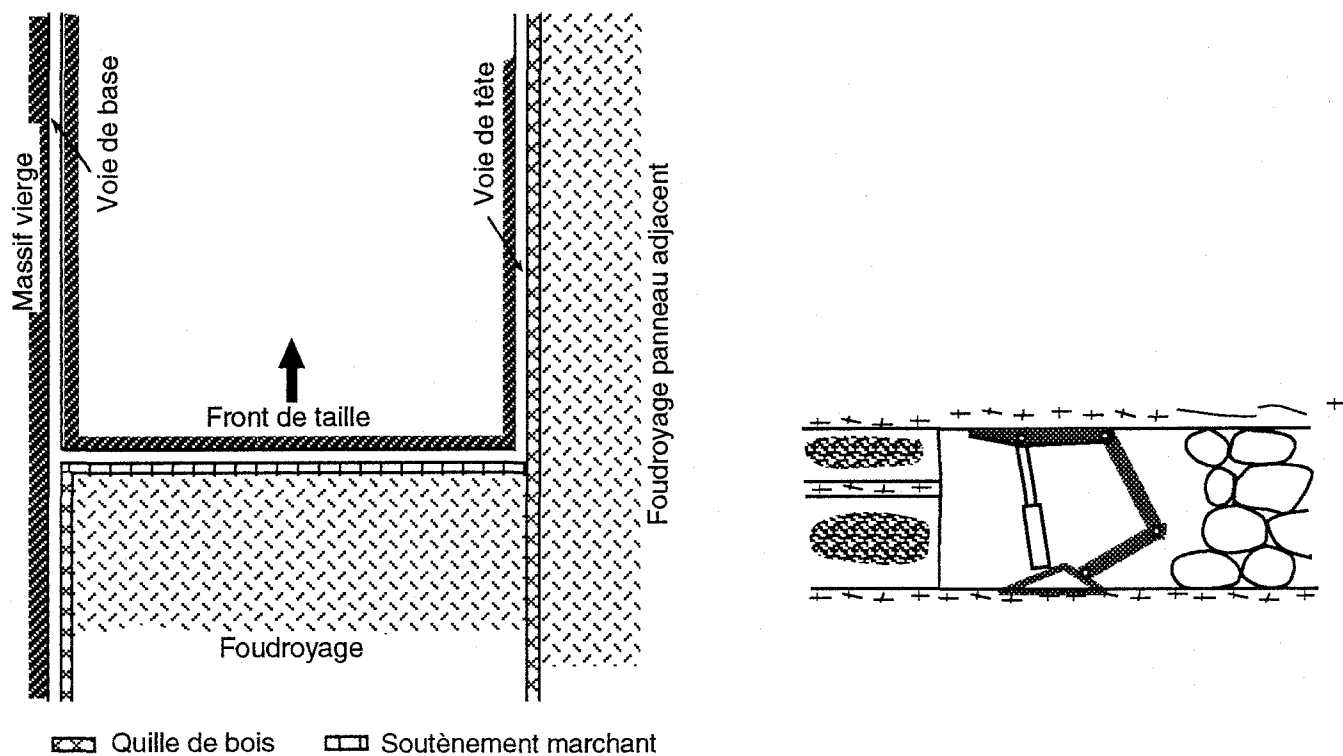


Fig. 1 : U.E. Provence  
Représentation schématique d'une exploitation par taille

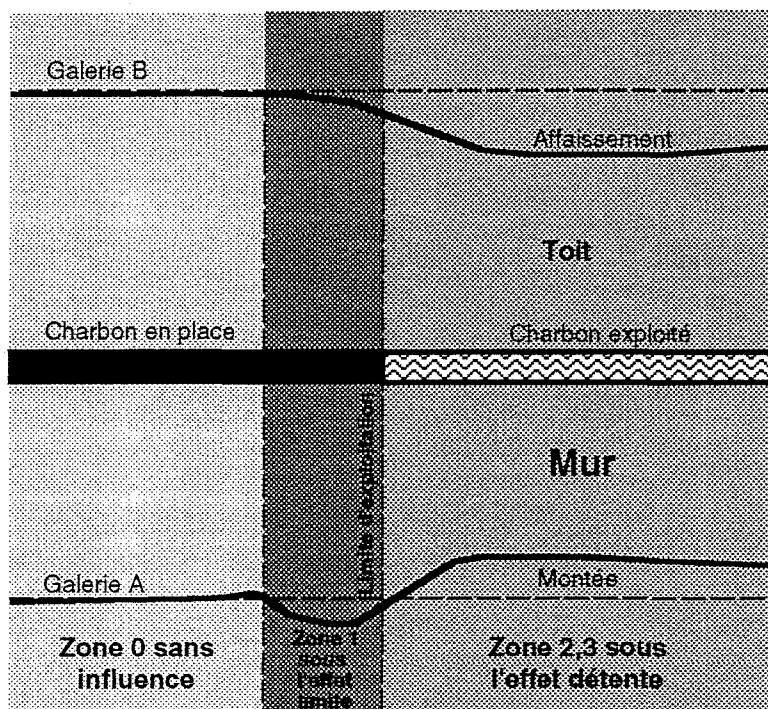


Fig. 2 : Position d'une galerie par rapport à une exploitation  
(Volume d'influence en plateures, d'après HENRY, 1978)

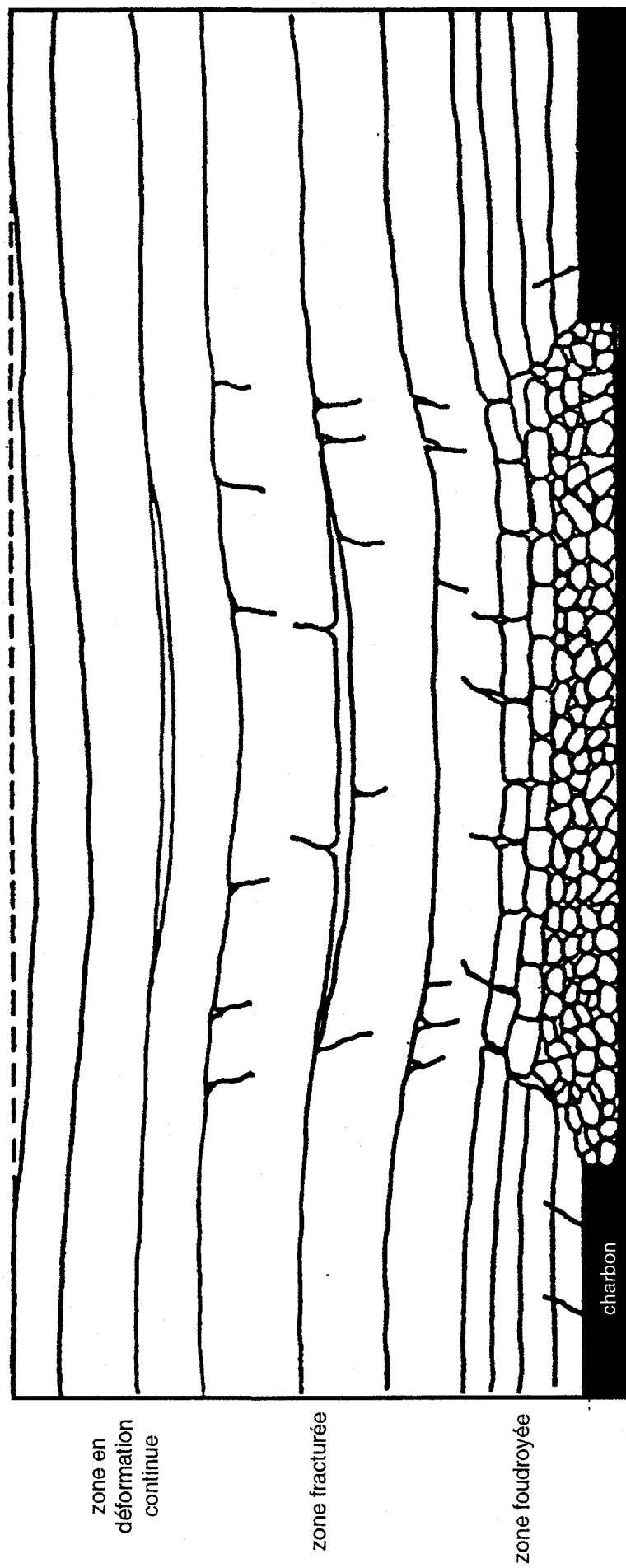


Fig. 3 : Répartition des zones au dessus de la taille, loin derrière le front de taille (d'après Peng et Chiang, 1984)

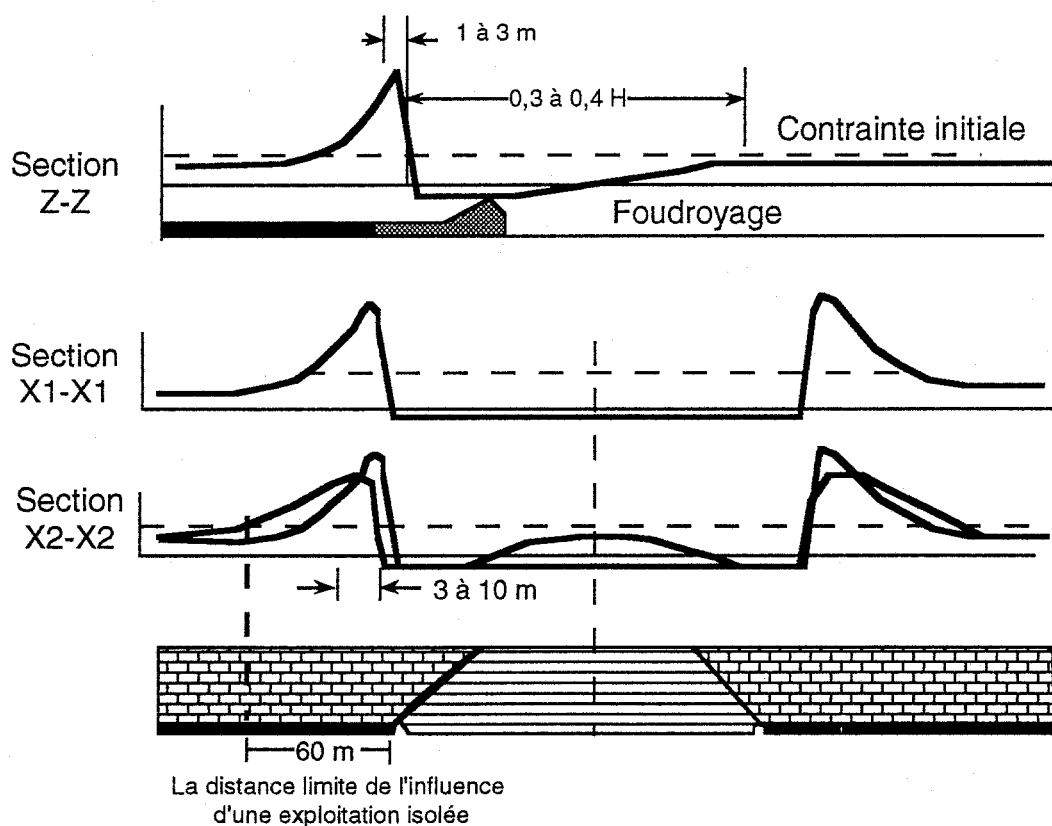
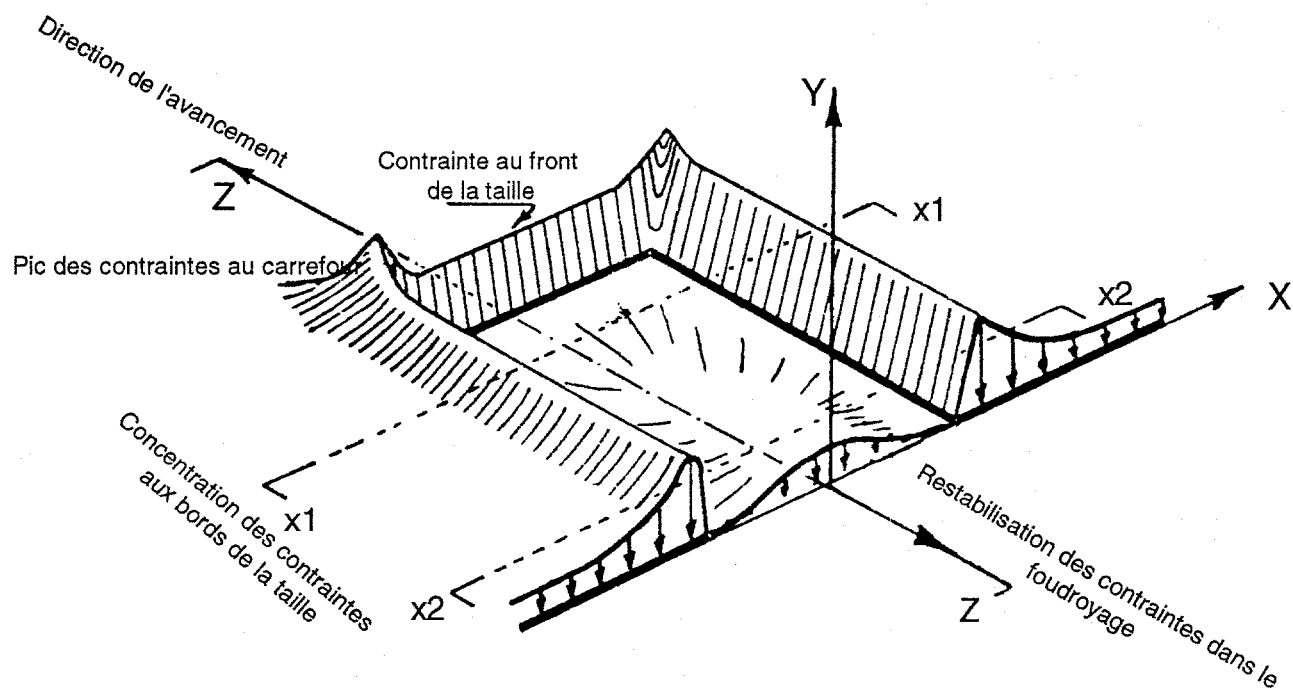
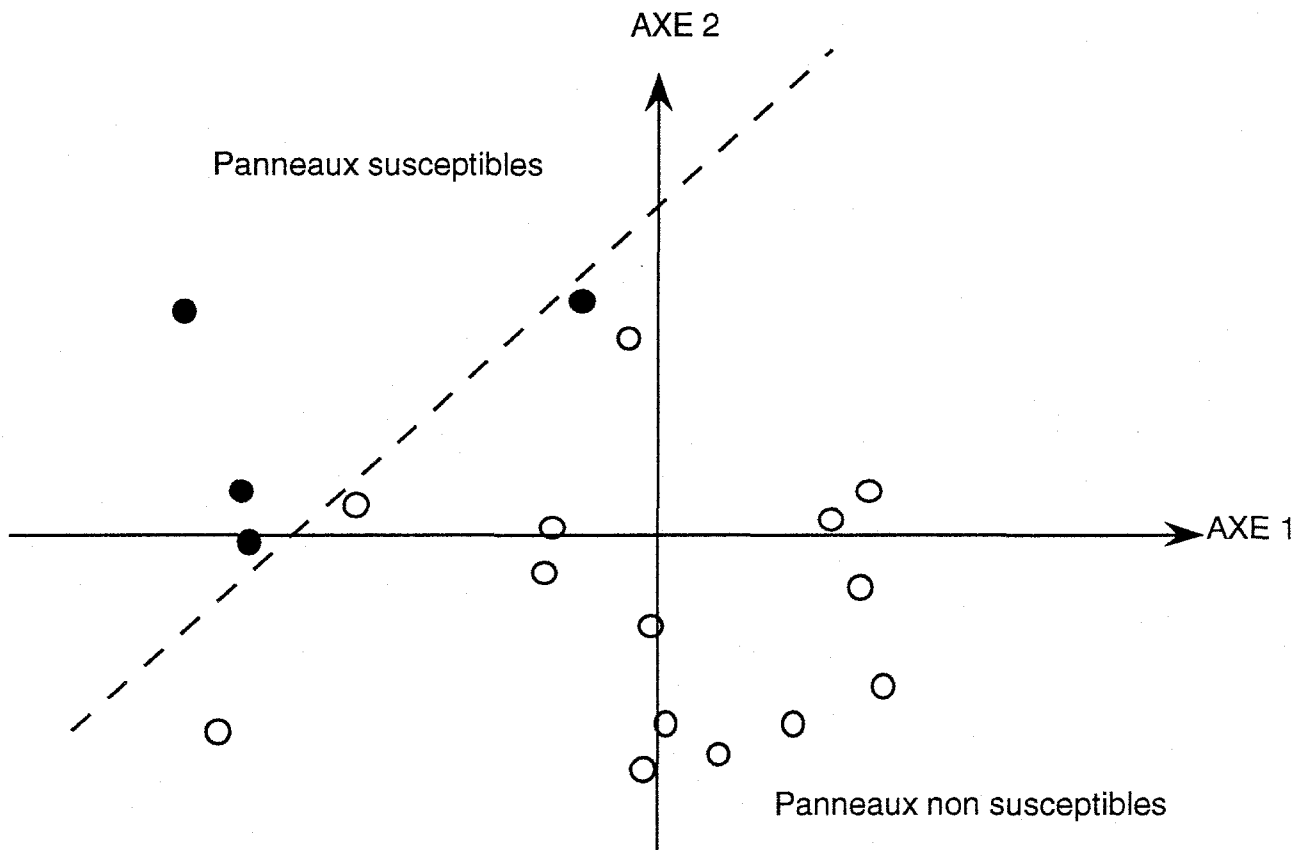


Fig. 4 : Distribution des contraintes dans le plan de la couche, autour d'un panneau exploité par longue taille (d'après WHITTAKER, 1974).



- panneaux sans coups de terrains
- panneaux avec coups de terrains

AXE 1 : "NIVEAU de CONTRAINTES"

- Contraintes naturelles élevées
- Surcontraintes d'exploitation
- Largeur exploitée importante

AXE 2 : "NATURE des TERRAINS"

- Raideur élevée du toit
- Veine à structure hétérogène

Analyses en composantes principales de 26 panneaux ,  
projection des panneaux sur le premier plan principale

Fig . 5 : Caractéristiques des panneaux exploitées et susceptibilité  
aux coups de terrains  
(d'après REVALOR et al, 1989)

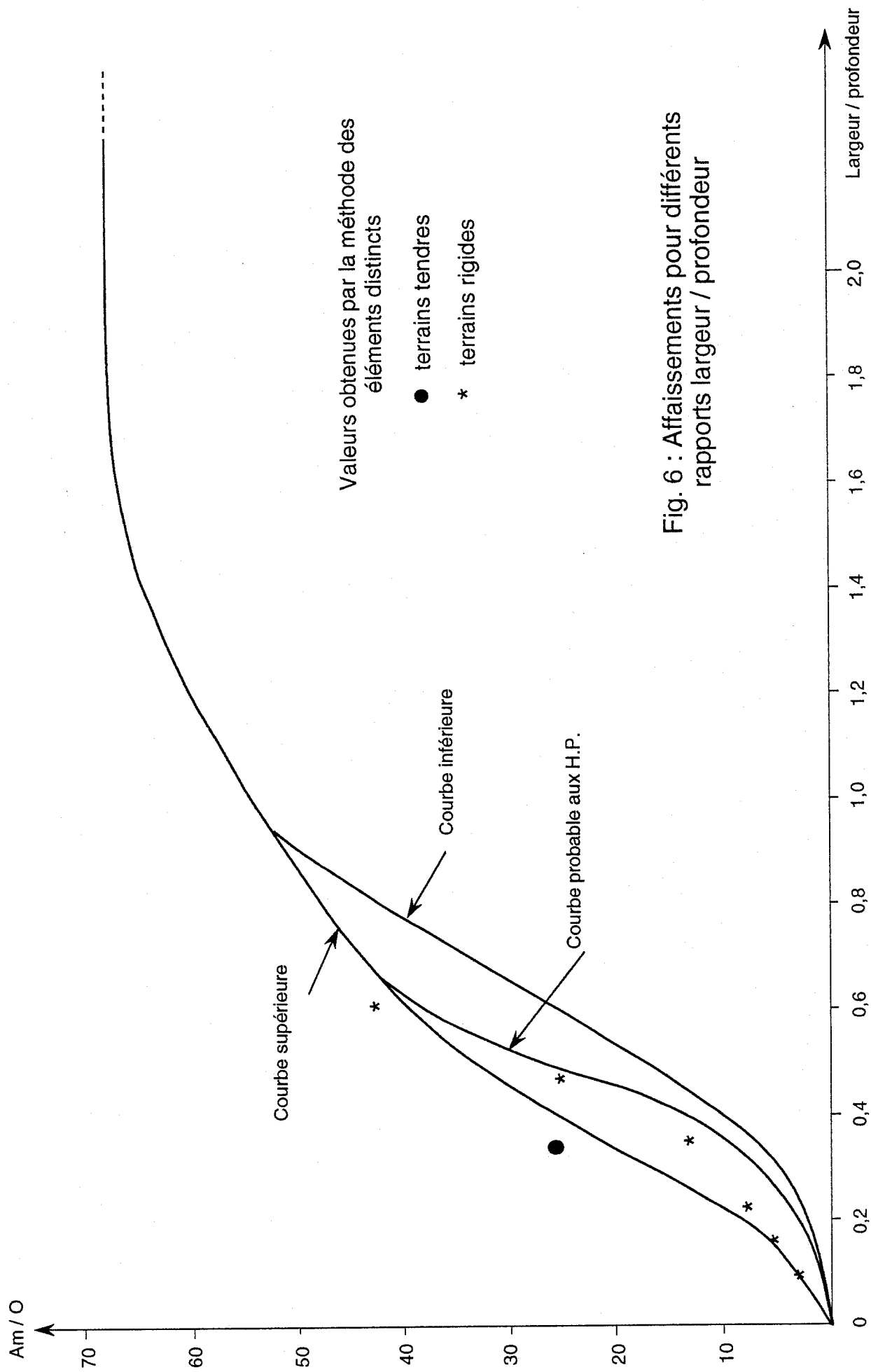
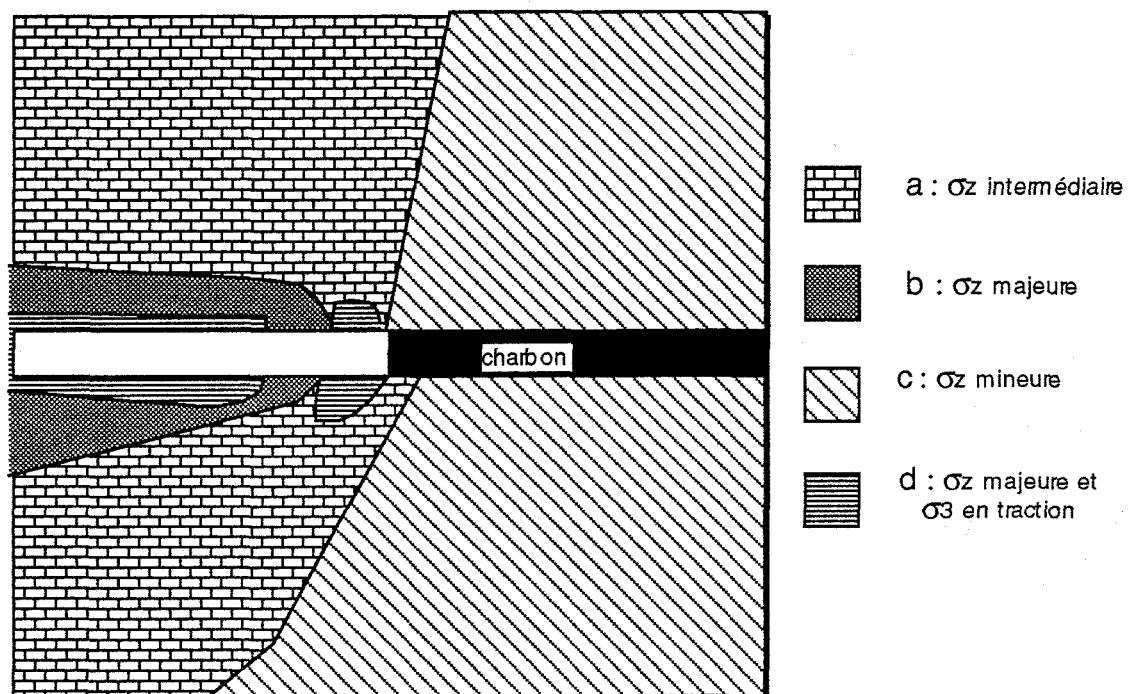
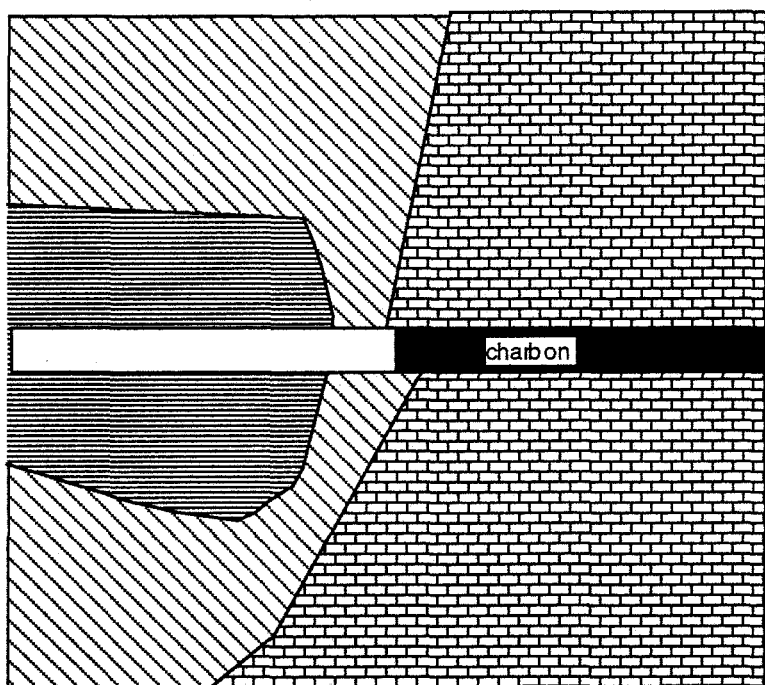


Fig. 6 : Affaissements pour différents rapports largeur / profondeur



I - Contraintes principales dans le cas correspondant à des contraintes initiales  $\sigma_x = \sigma_y = -20 \text{ MPa}$  et  $\sigma_z = -10 \text{ MPa}$



II - Contraintes principales dans le cas correspondant à des contraintes initiales  $\sigma_z = \sigma_y = -20 \text{ MPa}$  et  $\sigma_x = -10 \text{ MPa}$

Fig. 7 : Distribution des contraintes principales après exploitation en fonction des contraintes initiales.



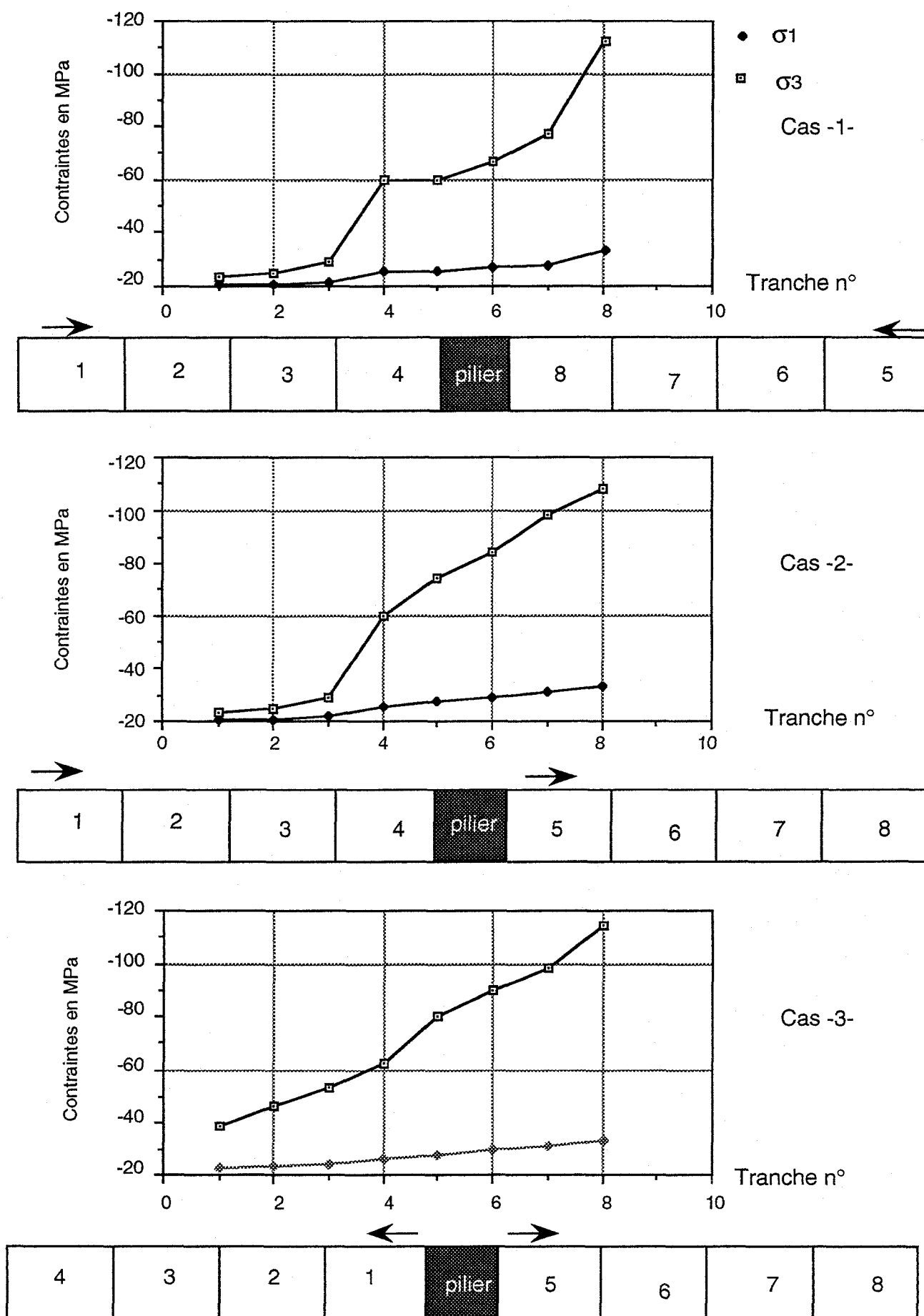


Fig 8 : Contraintes principales dans le pilier selon trois chemins d'exploitation.

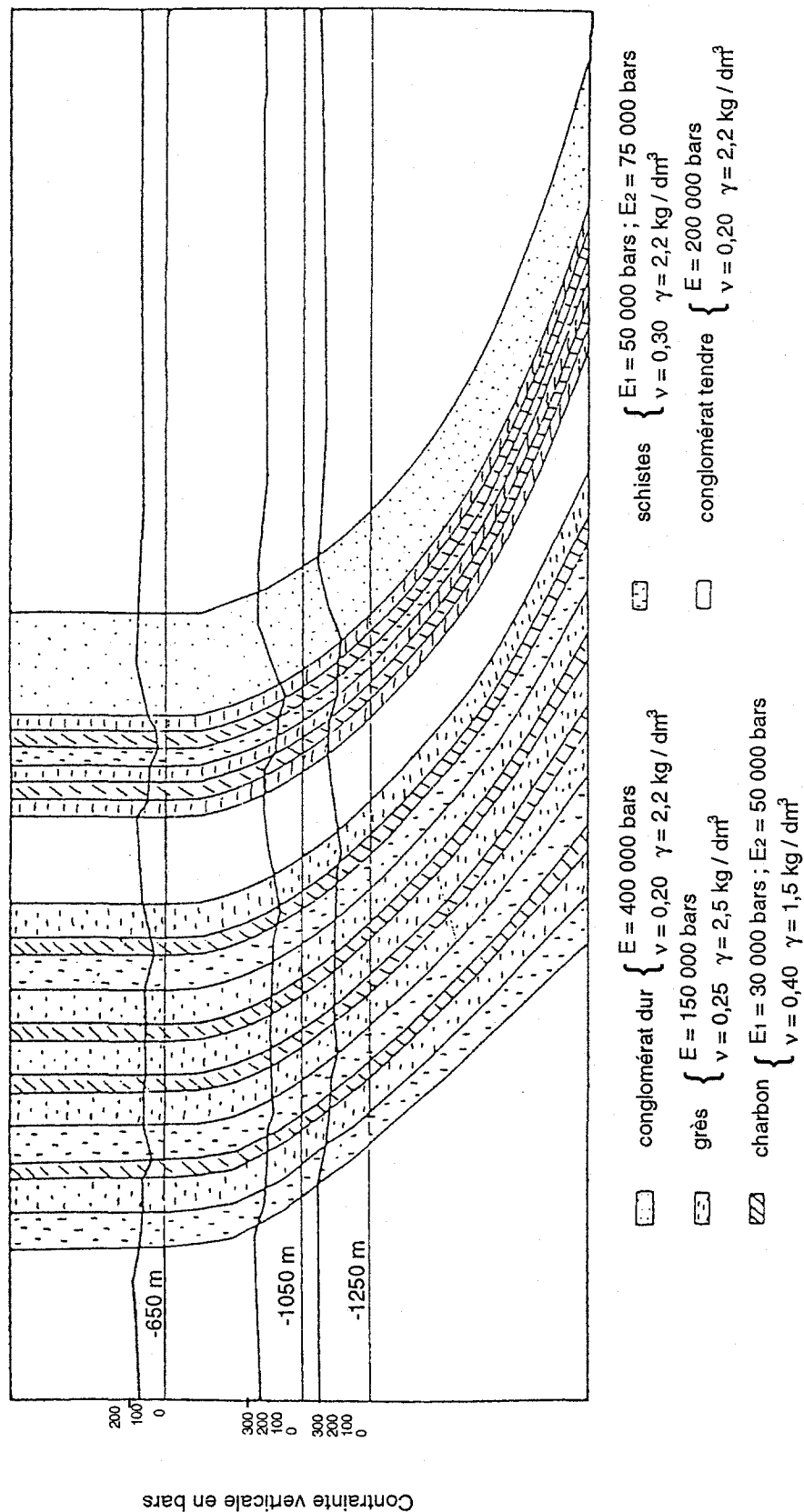
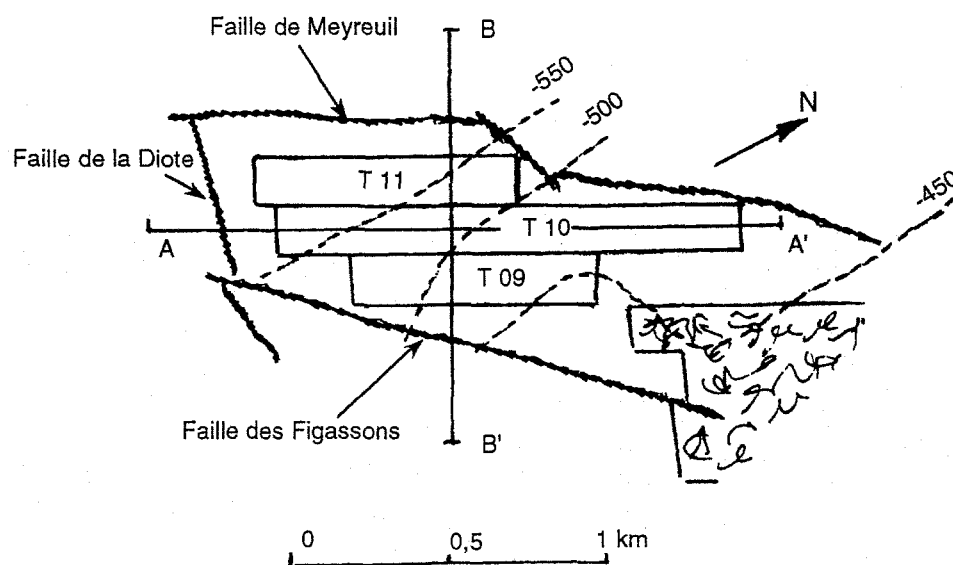
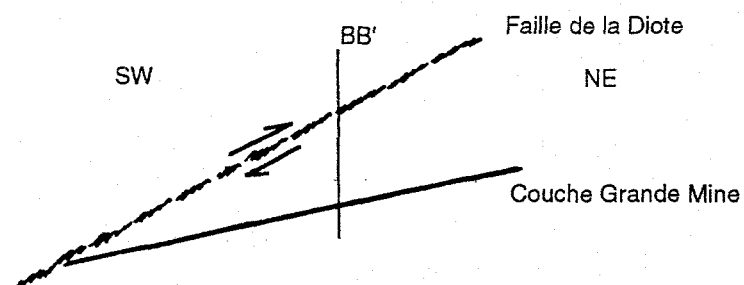


Fig. 9 : Répartition des contraintes verticales dans une coupe verticale  
dans le gisement de dressants de Merlebach (U.E. Vouters)  
(d'après FIGUET, 1981)

a - Plan de situation



b - Coupe schématique AA'



c - Coupe schématique BB'

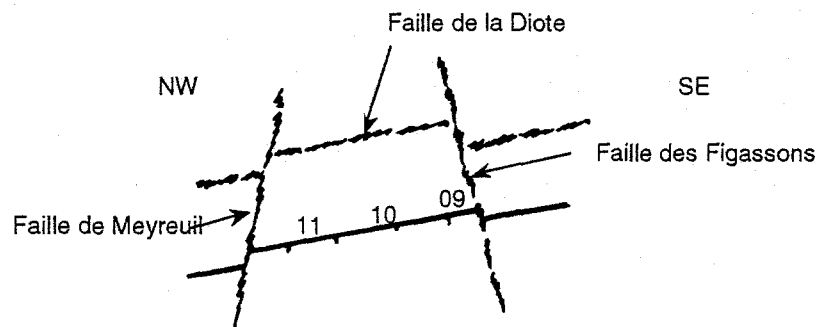


Fig. 10 : U.E. Provence - Quartier de l'Etoile Sud

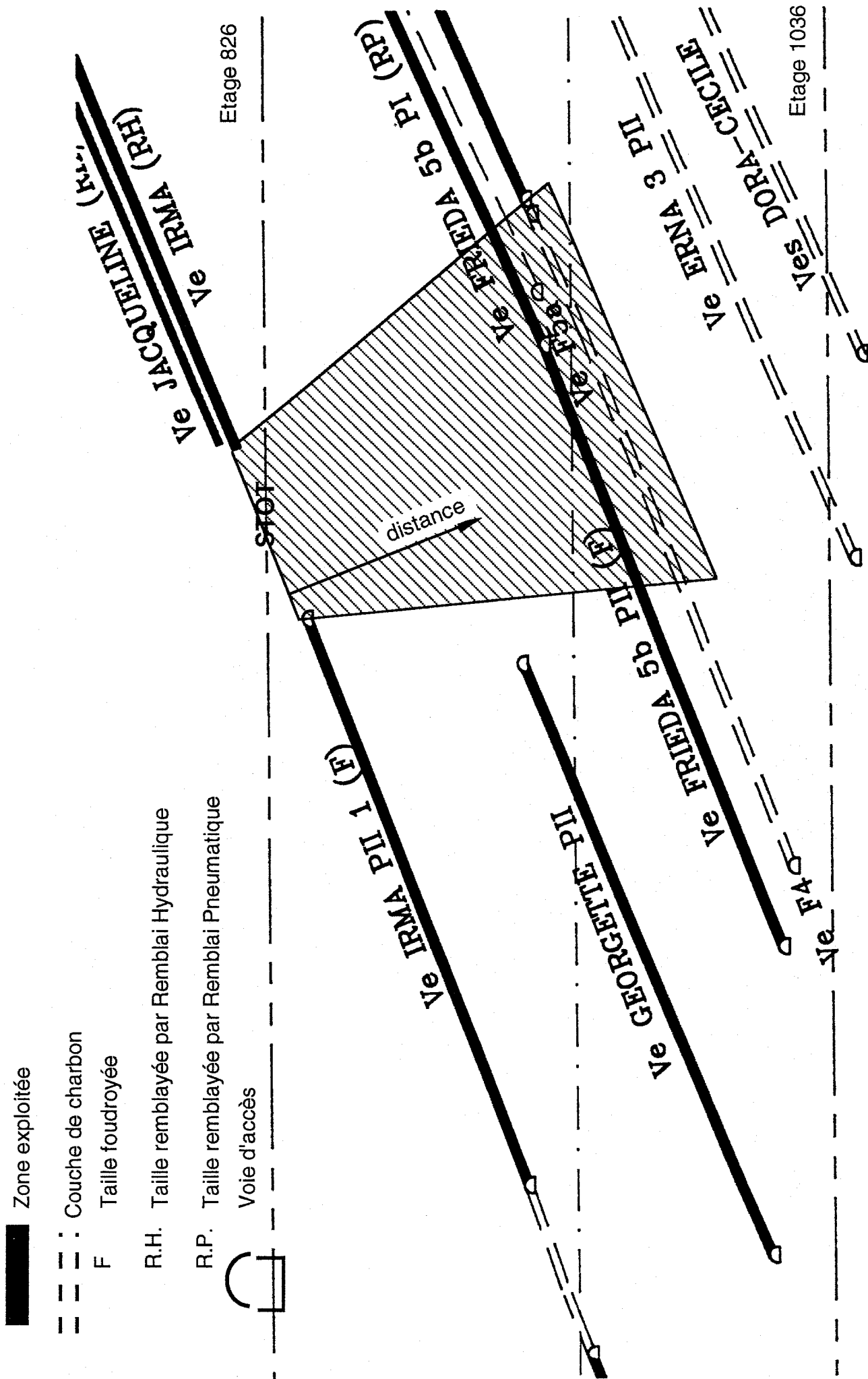


Fig. 11 : U.E. Reumaux - Champ Cocheren  
Coupe (3-3) passant par Veine Georgette

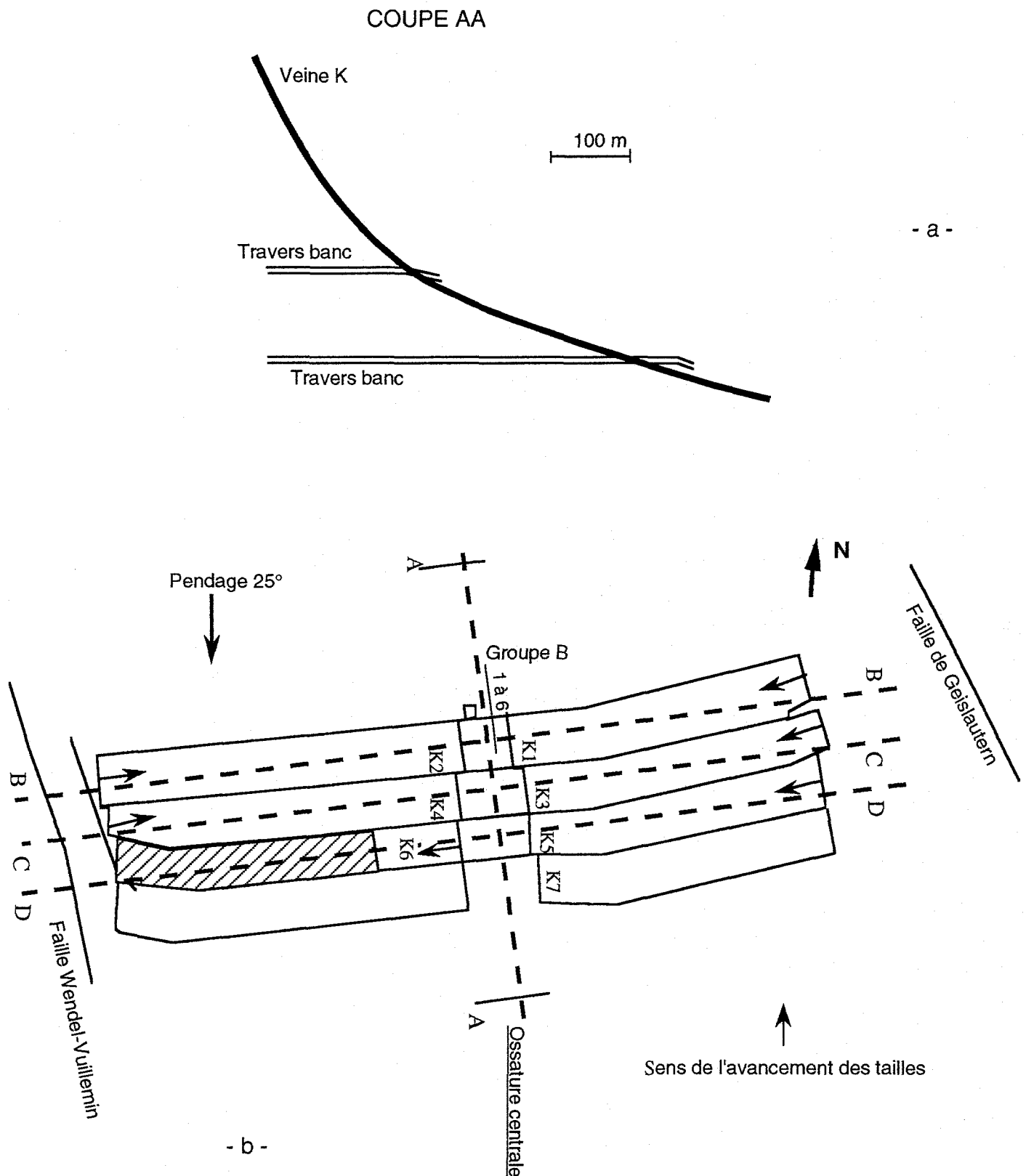


Fig. 12 : UE. Forbach - Champ Creutzberg  
 Vue en plan (AA, BB CC et DD sont les plans de coupes  
 proposés pour la modélisation en 2D)

N° du modèle	Tailles exploitées	Largeur du stot (m)	H (m)	$\sigma_3$ (MPa)	$\sigma_1$ (MPa)	F
BB	1 - 2	150	35	-134	-27	0,7
CC	3 - 4	200	20	-130	-6,8	0,58
DD	5 - 6	225	10	-82	-45	2

H : Distance verticale entre le toit de la veine K et le conglomérat

Contraintes principales au milieu de l'ossature (au coeur du pilier) pour les trois cas de calcul

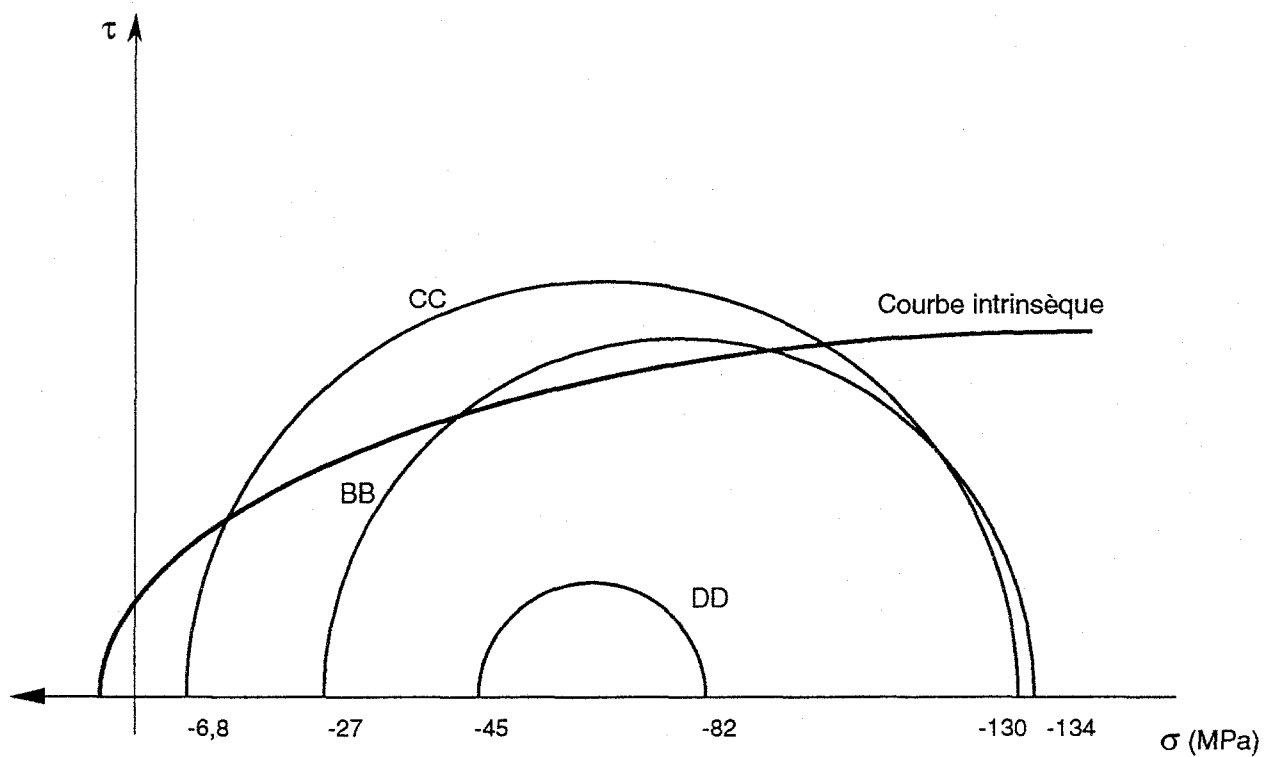


Fig. 13 : Etat de rupture pour chaque configuration